

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-244394

(43)Date of publication of application : 08.09.2000

(51)Int.Cl.

H04B 10/02

H04B 10/18

(21)Application number : 2000-040395

(71)Applicant : LUCENT TECHNOL INC

(22)Date of filing : 18.02.2000

(72)Inventor : EGGLETON BENJAMIN JOHN
NIELSEN TORBEN N
ROGERS JOHN A
STRASSER THOMAS ANDREW
WALKER KENNETH LEE

(30)Priority

Priority number : 99 252708

Priority date : 18.02.1999

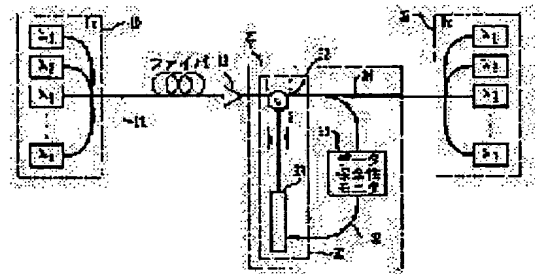
Priority country : US

(54) OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM EQUIPMENT WITH AUTOMATIC DISTRIBUTION COMPENSATING MODULE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To optimize the performance of an optical communication system by providing a data maintenance monitor, and adjusting dispersion elements so that the performance of this system is optimized, and deciding the distribution of grating according to the strength of added currents, detecting the maintenance of transmitted data and controlling the currents to be added to the grating.

SOLUTION: Each automatic distribution compensating module 20 is provided with a variable distribution compensator 30, a data maintenance monitor 31 and a feedback network 32, and the monitor 31 adjusts the distribution compensator 30 through the feedback network 32 so that the performance of this system is optimized. Part of a signal on a transmission fiber path 11 is sampled, for example, by a tap 34, and this signals is analyzed so that the scale of the maintenance of the transmitted data can be obtained, and a feedback signal for controlling a variable distribution compensation grating 33 can be obtained from this scale. In the variable distribution compensator 30, a signal light from the transmission fiber 11 is directed to the variable distribution compensation grating 33.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

25.05.2001

[Date of sending the examiner's decision of

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-244394

(P2000-244394A)

(43) 公開日 平成12年9月8日 (2000.9.8)

(51) Int. Cl.

H04B 10/02
10/18

識別記号

F I

H04B 9/00

特 許 出 願 公 開 特 許 公 報 (A)

M

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2000-40395(P2000-40395)

(22) 出願日 平成12年2月18日 (2000.2.18)

(31) 優先権主要番号 09/252708

(32) 優先日 平成11年2月18日 (1999.2.18)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 596092698

ルーセント テクノロジーズ インコーポ
レーテッド

アメリカ合衆国, 07974-0636 ニュージ
ヤージー, マレイ ヒル, マウンテン ア
ヴェニュー 600

(72) 発明者 ベンジャミン ジョン エググルトン

アメリカ合衆国 07901 ニュージャ
ーシ, サミット, オープレイ ストリート
17

(74) 代理人 100064447

弁理士 岡部 正夫 (外11名)

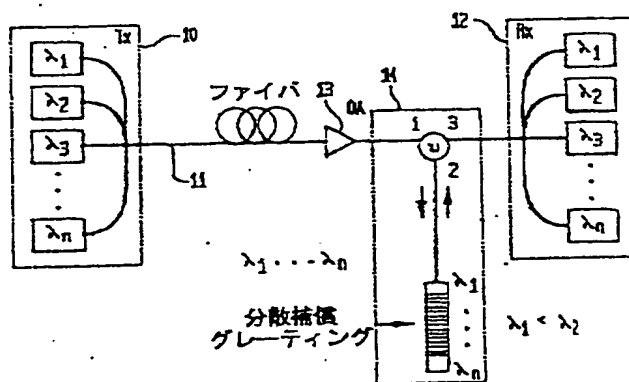
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自動分散補償モジュールを備えた光通信システム

(57) 【要約】

【課題】 自動分散補償モジュールを備えた光通信システム。

【解決手段】 本発明は、一つあるいは複数の自動（動的）分散補償モジュールを備えた光通信システムを開示する。各モジュールは、可変分散要素、データ保全性（健全性）モニタ、およびフィードバック網から構成され、モニタはこれによって分散要素をシステムの性能が最適化されるように調節する。一つの好ましい実施例においては、分散補償モジュールはチャープドブラッググレーティングから成り、グレーティング内のチャープはファイバの長さ方向に沿って配置された薄膜ヒータに電流を流すことによって誘発される。加えられる電流の強さによって、グレーティングの分散が決定される。データ保全性モニタは、伝送されるデータの保全性を検知し、グレーティングに加えられる電流を制御するための電気フィードバック（信号）を生成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくとも一つの光信号チャネルを提供する光送信機、光ファイバ伝送路、および光受信機から構成される光ファイバ通信システムであって、このシステムが最適経路分散の変動を光信号電力の関数として受け、このシステムが、改善点として：前記伝送路に結合された少なくとも一つの自動分散補償モジュールを備え、この補償モジュールが、可変分散補償要素、システム上に伝送されているデータの保全性をモニタするためのデータ保全性モニタ、および前記モニタから前記可変分散補償要素へのフィードバック回路から成り、これによって、前記分散補償要素がシステムを通じてのデータの保全性が最適化されるように調節されることを特徴とするシステム。

【請求項2】 前記可変分散補償要素が、調節可能なチャープを持つブラッググレーティングから成ることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項3】 前記可変分散補償要素が、熱的に調節可能なチャープを持つブラッググレーティングから成ることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項4】 前記可変分散補償要素が、磁氣的に調節可能なチャープを持つブラッググレーティングから成ることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項5】 前記データ保全性モニタが、伝送された信号のスペクトラムを解析するためのスペクトラムプロセッサと前記スペクトラムに基づいて最適化フィードバック信号を計算するためのデータプロセッサから構成されることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項6】 前記データ保全性モニタが、伝送された信号のエラーを検出するためのエラー検出回路と前記エラーに基づいて最適化フィードバック信号を計算するためのデータプロセッサから構成されることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項7】 前記エラー検出回路が、順方向エラー修正回路から成ることを特徴とする請求項1のシステム。

【請求項8】 前記エラー修正回路が、リードソロモン (Reed Solomon) 順方向エラー修正アルゴリズムを用いることを特徴とする請求項7のシステム。

【請求項9】 前記エラー検出回路が、データを運ぶために用いられるフレーミングフォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項6のシステム。

【請求項10】 前記エラー検出回路が、SONET (同期光通信網) フォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項9のシステム。

【請求項11】 前記エラー検出回路が、ATM (非同期転送モード) フォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項9のシステム。

【請求項12】 前記エラー検出回路が、FDDI (光ファイバ分散データインタフェース) フォーマット内のエラーを検出することを特徴とする請求項9のシステム。

ム。

【請求項13】 前記光送信機が複数の波長の異なる光信号チャネルを提供する多重波長光送信機から成り、前記受信機が多重波長光受信機から成ることを特徴とする請求項1のシステム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は光通信システム、より詳細には、システム性能を最適化するための一つあるいは複数の自動クロマティック分散補償モジュールを備えた光通信システムに関する。

【0002】

【従来の技術】 光ファイバ通信システムは、膨大な量の情報を非常に高速に伝送するというそれらが有する大きな潜在力を達成しつつある。本質的には、光ファイバシステムは、情報を運ぶ光信号のソース、光信号を運ぶための光ファイバ伝送ライン、および光信号を検出し、光信号が運ぶ情報を復調するための受信機から構成される。加えて、典型的には、光増幅器が伝送ラインに沿って等間隔に配置され、追加/脱落ノードが適当な位置に信号チャネルを追加あるいは脱落するために配置される。

【0003】 光通信システムは、通常は、伝送媒体として、高純度のシリカ光ファイバを用いる。従来のシステムは、典型的には、光信号を、ある波長範囲を用いて伝送するように設計され、より長い波長成分は、より短い波長成分より、若干長い伝搬時間の遅延を受ける。ただし、このクロマティック分散は、今までは、光信号の情報内容をそれほど劣化させることはなかった。これは、初期のシステムは、単一のチャネルを分散が低い限られた波長領域から選んで用いるためである。

【0004】 ところが、今日では、より多くの情報を運ぶために、多数のチャネルをより広い波長領域に渡って用いることが必要となっており (WDMシステム)、これに伴って、グループ速度分散をより精密に補償することが要求されるようになっている。例えば、WDMシステムは、膨大な量の情報を伝送する能力、およびチャネルの追加/脱落やクロス接続などの網機能を容易に組み込める能力を備えるために、その重要性が増大しているが、WDMシステム内に提供されるチャネルの数の増加に伴って分散の補償がますます重要な課題となっている。

【0005】 分散は、望ましくないパルスの歪みをもたらし、結果として、帯域幅および/あるいは伝送距離を制約する要因となる。このため、分散の補償は、通信システムの性能および終局的な商業上の成功にとって極めて重要であり、波長チャネル当たり10 Gbit/sあるいはそれ以上の速度で動作するシステムでは、特に重要である。分散の補償は、典型的には、特別に設計された光ファイバ、例えば、規定される分散を持つファイ

バや、チャープドファイバグレーティングを備えたファイバを用いて達成されるが、これらは両方とも、ある与えられたファイババンドの分散と、同一符号で反対規模の固定量の分散を提供することで機能する。これら技法は、両方とも、実証済みで、光波システムに組み込まれつつある。

【0006】高速WDM光波網の性能は、システム設計の詳細に大きく依存するが、特に、インライン分散のレベル、分散勾配の補償、並びに、分散補償ファイバ(DCF)内で発生する非線形効果は、重要である。さらに、高速WDM光波システムでは、例えば、光増幅器の利得の不完全な平坦化などに起因して発生する光電力の小さな変動のために追加の非線形位相シフトが発生し、このためにシステムの最適分散マップが変化することもある。この問題は、広い帯域幅に渡っての動作では、分散勾配の補償が不完全となり、分散バジッド(予算)が低減するために、一層深刻となる。例えば、約40nmの帯域幅にて動作し、0.05ps/nm²kmなる未補償の分散勾配を持つ典型的なシステムの場合は、分散内の累積ダイバージェンス(DCFによる約60%の補償を想定した場合)、約1.2ps/nm²kmとなる。対応する分散バジッドは、典型的には、この値の2倍に取られ、2.4ps/nm²kmとなる。このことから、重大なペナルティを発生することなく達成することができる最大伝送距離(L)は、以下によって与えられることがわかる：

$$L < 104,000 / (B^2 |D|) (Gb/s)^2 ps/nm \quad (1)$$

ここで、Bは、チャンネル速度を表し、D、つまり、ファイバの分散は、40 Gbit/sのシステムでは、32kmであり、10 Gbit/sのシステムでは、512kmである。こうして、10 Gbit/s、40 Gbit/s、あるいはこれ以上の速度で動作するシステムでは、光電力の動的な変動と分散勾配に関連する低減された分散バジッドの両方が組み合わさって網の設計を極めて困難なものにすることがわかる。

【0007】これら波長の変動と電力レベルの変動のために、固定すなわち静的な分散補償デバイス、例えば、分散補償ファイバ(DCF)や従来のチャープドブラッググレーティングにて、高速WDM光波網内の避けることができない分散および非線形性を効果的に管理(制御)することは、極めて困難である。加えて、光網では、典型的には、網内の総光電力および/あるいは電力の分布が変化する度に最適経路分散の低速な変動が発生する。

【0008】図1は、従来の光ファイバ伝送システムの一例を示す。このシステムは、送信機10、伝送ファイバ路11、および受信機12から構成される。このシステムは、さらに、一つあるいは複数の静的分散補償モジュール14を備える。伝送路は、典型的には、従来の光伝送ファイバから成り、オプションとして、一つあるい

は複数の光増幅器13(典型的にはエルビウム増幅器)が設置される。送信機の出力の所で、パルスの形状が整形され、よく整えられる。典型的には、複数の光増幅器13を含む幾百キロにも及ぶ光ファイバ11内を通る過程で、このパルスは、次第に、広がり、歪みも増大するが、このパルスは、(静的)分散補償モジュール14に通されることで、再整形され、ほとんど元の形状に回復される。

【0009】現実の光システムでは、伝送ファイバおよび網の他の要素内に大きな非線形性が発生し、これら非線形性は、静的モジュールによる分散の完全な補償を阻害する。つまり、固定の分散補償要素にてシステムを最適化することは、非線形性のために追加の位相シフトおよびパルスの歪みが発生し、これらは、光電力に依存し、従って、網上のトラックが変化したり、エルビウムドープ増幅器の利得が変化したりするのに伴って、時間と共に変化するために、困難である。つまり、現実の高ビット速度光網では、全ての箇所、全ての時間において、パルスの完全な回復を確保することは極めて困難であり、このため、補償されないパルスの歪みが累積し、システムの性能を著しく劣化させる結果となる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】加えて、一つではなく複数のチャンネルを用いる光システム(波長分割多重システム)では、発生するパルスの歪みは、チャンネルにも依存し、これも、時間と共に変動する。波長分割多重システムでは、網内の選択されたノードにおいて特定のチャンネルを追加あるいは脱落できる能力が必要となり、このチャンネルの追加および脱落は、例えば、所望のチャンネルを反射し、他の全てのチャンネルは透過(伝送)するファイバグレーティングを用いることで達成される。ただし、チャンネルの追加/脱落に伴ってファイバ内の平均電力が変動するという新たな問題が発生する。この変動は、利得平坦器によって対応されるが、ただし、光電力の小さな変動は避けられない。この電力の変動の結果として、伝送ファイバ内のパルスは追加の歪みを受け、このため、時間によって分散の補償の量を変化させる必要がある。

【0011】望ましくない分散の影響を除去するための様々なアプローチが提唱されている。とりわけ、(a) 光パルスの再生、(b) 光学位相共役(OPC)、

(c) 光ソリトン、などの技法は、有望であり、実験室環境では実証されている。ただし、これらは、現在展開されている現実のシステムに適用された場合は、重大な制約を持つ。例えば、光学位相共役(OPC)(中間バンドスペクトル反転とも呼ばれる)は、分散の補償をリンクの中間点で遂行することを必要とされ、この要件は、多くの光網の設計では、通常は、満足できない。ソリトンシステムは、非常に魅力的ではあるが、ただし、システムの分散マップを厳格に管理する必要があり、他

の短所もある。

【0012】網の再構成に起因するファイバの分散の変化を補償するために、通信システム内に動的分散要素を用いることも提唱されている。詳しくは、例えば、J.X. Caiらによって、Proceedings of Optical Fiber Conference, 1998, page 365 (1998)に掲載の論文を参照されたいが、この文献は、伝送経路の長さの変化を補償するために、分散モニタと、動的分散要素を用いることを提唱する。このモニタは、送信機と受信機との間の総クロマティック分散を測定するが、ただし、このアプローチは、分散は測定するが、伝送されたデータの健全性（健全性）を直接に測定することはない。これは、伝送の際にデータも非線形な影響のために歪みを受けることや、分散モニタによっては測定されない累積された位相シフトのためにシステムの性能を最適化するために要求される分散の補償が変化することなどを考えると、重大な欠陥である。従って、システムの性能を最適化するための改善された自動（動的）分散補償モジュールに対する必要性が存在する。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明は、一つあるいは複数の自動（動的）分散補償モジュールを備えた光通信システムを開示する。各モジュールは、可変分散要素、データ健全性（健全性）モニタ、およびフィードバック網から構成され、モニタはこれによって分散要素をシステムの性能が最適化されるように調節する。一つの好ましい実施例においては、分散補償モジュールはチャープブラッググレーティングから成り、グレーティング内のチャープはファイバの長さ方向に沿って配置された薄膜ヒータに電流を流すことによって誘発される。加えられる電流の強さによって、グレーティングの分散が決定される。データ健全性モニタは、伝送されるデータの健全性を検知し、グレーティングに加えられる電流を制御するための電気フィードバック（信号）を生成する。

【0014】本発明の性質、長所および他の様々な特徴が、本発明の実施例の以下の説明を付属の図面を参照しながら読むことで一層明らかになるものである。

【0015】

【発明の実施の形態】この説明は、3つのパートから成る。パート1では、自動分散補償モジュールを採用する光通信システムについて説明し、パート2では、このモジュールに適する一例としての可変分散補償グレーティングについて説明し、パート3では、このモジュールに適する一例としてのデータ健全性（健全性）モニタについて説明する。

【0016】1. 自動分散補償モジュールを備える通信システム

図面の説明に移り、図2は、本発明による一つあるいは複数の自動分散補償モジュール20を備える一例としての光通信システムを簡略的に示す。このシステムは、自

動分散補償モジュール20が追加される点を除いて、図1のシステムと類似する。このモジュールは、一つあるいは複数の静的補償モジュール（図1の14）を補強するためあるいはこれらの代替として、システム性能を最適化する目的で用いられる。

【0017】各自動分散補償モジュール20は、可変分散補償器30、データ健全性モニタ31、およびフィードバック網32を備え、モニタ31は、フィードバック網32を介して分散補償器30をシステムの性能が最適化されるように調節する。この一例としてのモジュールにおいては、可変分散補償器30は、伝送ファイバに結合された光サーキュレータ32と可変分散補償グレーティング（DCG）33から成る。モニタ31は、伝送ラインに結合された光受信機と、受信された信号からフィードバック制御信号を派生（生成）するためのデータプロセッサを含む。

【0018】動作においては、伝送ファイバ11上の信号の一部が、例えば、タップ34によってサンプリングされ、この信号を解析することで伝送されたデータの健全性（健全性）の尺度が得られ、この尺度から可変分散補償グレーティング（DCG）33を制御するためのフィードバック信号が得られる。冗長符号化データが伝送される場合は、この解析は、システム内のエラーに高度に敏感なように選択された閾値レベルといった単純なものとされ、フィードバック（信号）は、エラー率を最小化するように選択される。冗長コーディングには、例えば、既に光伝送において用いられているエラー検出信号、例えば、SonetプロトコルのB-オクテット内のビットインタリーブドパリティ8エラー検出コードが用いられる。

【0019】可変分散補償器30内においては、伝送ファイバ11からの信号光は、サーキュレータ32の一つのポートに入り、第二のポートの所に配置された可変分散補償グレーティング（DCG）33に向けられる。この実施例では、この可変分散補償グレーティング（DCG）33には、反射モードにて動作する可変ブラッググレーティング（Bragg grating）が用いられ、補償された信号光は、サーキュレータ32に反射され、その後、伝送ファイバ11の次のセグメントに向かう。

【0020】可変分散補償グレーティング（DCG）33は、様々な可変分散グレーティングデバイスを用いて実現することができる。例えば、調節可能なチャープを持つグレーティングを用いて、チャープを、テーパー抵抗型ヒータ、テーパーストレインリリース（歪み解放）あるいは磁氣的に調節可能なストレインによって調節することなどが考えられる。抵抗型ヒータを利用した可変分散グレーティングデバイスについては、Eggletonらによって1998年10月30日付けで出願された“Optical Grating Devices With Adjustable Chirp”なる名称の合衆国特許出願第08/183,048号において開示されており、磁氣的

に調節可能なデバイスについては、S.Jinらによって1998年9月23日付けで出願された“Tunable Dispersion Compensator and Optical System Comprising Same”なる名称の合衆国特許出願第09/159,178号において開示されているために、これら両方の文献も参照されたい。

【0021】データ保全性モニタ31には、伝送されたデータの品質を維持するために、システムの性能レベルを検知することができる様々なタイプのモニタを用いることができる。伝送されたデータの品質は、例えば、伝送されたスペクトルを解析することで間接的に検知することも、あるいは、エラー率を解析することで直接的に検知することもできる。

【0022】2. 可変分散補償グレーティング (DCG)

図3は、図2の実施例に用いるのに適する一例としての可変分散補償グレーティング (DCG) 33を示す。グレーティング40は、ファイバ42内にアポダイズドブラッググレーティング (apodized Bragg grating) を形成するように設けられた一連の屈折率のパターン（振動）41から成る。グレーティング40は電気的に調節可能な熱変換体43と熱的に接触するように配置され、熱変換体43としては、発熱体もしくは熱を能動的に除去する吸熱体を用いられる。熱変換体43は、典型的には、発熱体、例えば、ファイバ上に設けられた抵抗膜とされる。熱変換体43は、例えば、抵抗がグレーティング40の軸方向に沿って直線的に変化し、このためグレーティングの発熱（温度）が直線的に変化し、直線的なチャープが達成できるようにされる。この抵抗の変化は、例えば、熱変換体43の厚さをグレーティングの軸方向に沿って変化させることで達成される。ベアの電極44、45によって、電源48、例えば、モニタフィードバック回路内に含まれる電源からのワイヤ46、47との電気的な接触が得られる。好ましくは、グレーティング40は、熱を隔絶するために、直径約1 cmの円筒状の管の中に密封される。このような熱的に調節可能なグレーティングの構造、製造および動作については、Eggletonらによって1998年10月30日付けで出願された“Optical Grating Devices With Adjustable Chirp”なる名称の合衆国特許出願S.N. 08/183,048号において詳細に説明されているために、これを参照されたい。

【0023】以下では、一つの具体的な可変グレーティング40の設計および解析について説明する。

具体例

以下では、一定な分散を全帯域幅を通じて提供し、加え

$$R(z) \sim 1/t(z)$$

ここで、 z は、グレーティングに沿っての位置を表す。発散される局所パワーは以下によって与えられるものと

$$P(z) = I^2 R(z)$$

さらに、局所的な温度変化は発散するパワーに比例する

$$\Delta\lambda_s(z) \sim \Delta T(z) \sim I^2/t(z)$$

る電圧を変化させることで、動的に調節可能なファイバグレーティングデバイスに関する詳細な結果について述べる。このデバイスは、グレーティングの長さ方向に沿っての直線的な温度勾配に依存し、この温度勾配は、膜厚がファイバの長さに沿っての位置に反比例して変化する金属コーティングの抵抗発熱によって誘発される。チャープ率、従って、分散は、加える電流を変化させることで、制御される。数値モデルおよび実験的根拠から、温度は、非常に良好な近似で、グレーティングの長さ方向に沿って直線的に変化し、結果としてのチャープは線形となることが実証された。最初に、1 W以下の電力にて、分散を300ps/nm~1350ps/nmの範囲で連続的にチューニング（調節）できることが実験的に実証された。グレーティングの分散特性の測定から、グループ遅延リブルは、約10psなる線形性からの平均偏差を持つことが判明したが、これは、このデバイスは、10 Gbit/s光波システムで動作するために十分に耐えられることを示す。以下では、最初に、このデバイスの動作の原理について説明し、続いて、チャープを規定する単純なモデル並びにそのような構造（モデル）を通じての熱の流れに関するより詳細な数値シミュレーションを示し、最後に、これらデバイスの幾つかの光学的測定値について要約する。

【0024】このデバイスは、膜厚がグレーティングの長さ方向に沿って変化するように金属の薄膜をコーティングされた無チャープのアポダイズドブラッググレーティング (apodized Bragg grating) から構成される。この膜に電流を流すと、局所的な抵抗性の発熱が起こるが、この発熱は、膜厚によって決定（支配）される。従って、膜厚を制御することで、温度プロファイル、従って、グレーティングのチャープを、かなりの程度まで、制御することが可能となる。以下では、簡単のために、

(1) ファイバのコア内の温度分布は、抵抗性の膜によって生成される発熱パワーの分布に従う（つまり、ファイバの長さに沿っての熱の流れのために温度分布の形状が発熱の分布から著しくずれることはない）、(2) 温度の増加は発熱パワーに正比例する（つまり、ファイバから流出する熱は、放射と対流は厳密には非線形な過程であるが、概ね線形である）、(3) ブラッグ共振のシフトは温度の変化に正比例し、このためチャープと膜厚プロファイルとの関係を記述する単純な式を導出することができる、ものと想定する。最初に、局所抵抗 $R(z)$ は膜厚 $t(z)$ に反比例するという事実を用いることで、以下が得られる：

$$(2)$$

し：

$$(3)$$

ものとすると、以下が得られる：

$$(4)$$

ここで、 $\Delta \lambda_s(z)$ は、ブラッグ波長の局所的なシフトを表し、 $\Delta T(z)$ は、温度の変化を表し、 I は、加えられる電流を表す。この式は、これらデバイスの挙動の単純な概算の記述を与え、可変グレーティングデバイスおよび関連する分散を設計するためのガイドとなる。例えば、膜厚がグレーティングの長さに沿っての距離に反比例する（つまり、 $t(z) \sim I/z$ によって与えられる）ものと想定すると、 $\Delta \lambda_s(z) \sim z$ となり、これは、ブラッグ波長が長さ方向に沿って線形的に変化するグレーティングに対応する。このグレーティングの分散は、良好な近似で、 $D = d\Delta\tau / d\Delta\lambda$ によって与えられる。ここで、 $\Delta\tau = 2nL/c$ は、グレーティングのラウンドトリップ時間を表し、 n は、ファイバの屈折

$$\nabla \cdot (\kappa(r) \nabla (T(r, z))) = 0$$

ここで、 $T(r, z)$ は、温度を表し、 $\kappa(r)$ は、熱伝導率を表す。この計算が、銀のテーパ膜を塗布されたガラス繊維（直径 $120 \mu\text{m}$ ）から成る2材料構造に対して遂行された。銀とガラス繊維との間の完全な熱的接触が想定され、これら2つの材料の間の境界に連続的な垂直な熱の流れが強制的に作られた。この計算には、適応メッシュリファインメント（適応メッシュ細分化）方式が用いられ、銀の表面からの放射および対流による熱損失の速度は、それぞれ、 $\sigma E(T_s - T_a)$ および $A(T_s - T_a)^{5/4}$ として与えられるものと想定された。ここで、 T_s は、金属（銀）の表面の温度を表し、 T_a は、周囲の温度を表し、 σ は、シュテファン-ボルツマン定数（Stefan-Boltzmann constant）を表し、 E は、金属表面の放射率を表し、 A は、空気の流れを特性化する定数を表す。金属膜の膜厚が $5 \sim 20$ ミクロンの範囲で変化され、ファイバの長さ方向に沿ってのシミュレートされた系のサイズは、皮膜された領域の温度分布が、ファイバの両端の境界条件に影響されないような十分な大きさに選択された（皮膜された領域の温度はその周囲の温度に固定された）。

【0026】図4a～4dは、グレーティングの加熱（発熱）を理解するために有益なグラフである。図4aは、ファイバに沿っての距離に概ね反比例する膜厚の皮膜を持つデバイスの様子を示す（このシミュレーションの目的に対しては、この皮膜は3つの直線部分に分割され、これらによって、膜厚が位置に反比例して連続的に変化する皮膜が近似される）。図4bは、デバイスのコアにおける計算温度を示す。この特定の系に対する結果は、前のパラグラフで説明した簡単のための想定が、コーティングの両端から離れた位置では妥当であることを示す（つまり、式（4）は、これらの位置では妥当であることを示す）。他方、コーティングの両端における温度の位置への依存性は、前のパラグラフで概説した想定（1）の妥当性の限界に対する概算の尺度を与え（図4cおよび4d参照）、これらは、ファイバの長さに沿っての熱の拡散がもたらす薄膜ヒータの形状から期待され

率を表し、 L は、グレーティングの長さを表し、 c は、真空中の光の速度を表し、 $\Delta \lambda_s$ は、グレーティングの帯域幅を表す。こうして、式（4）を用い、 $t(z) \sim I/z$ なる膜厚プロファイルを想定すると、グレーティングの分散は、加えられる電圧もしくは電流の二乗の逆数に比例する、すなわち、 $D \sim I/V^2 \sim I/I^2$ が成立する、ことを簡単に示すことができる。

【0025】簡単化のための想定を置かず、一般的な場合を扱うために、非線形有限要素モデリングを用いて、上述のような幾何（形状）を持つデバイスを動作したときの定常熱分布が計算された。すなわち、円筒対称性を想定し、以下に示す熱拡散に関する式が解かれた：

$$(5)$$

る温度分布からどの程度“スミアアウト（smears out）”するか（はみだすか）を示す。図4cおよび図4dが示すように、この系では、有効軸方向熱拡散長は、約 1 mm となる。ただし、この長さは、構造に沿って熱が外に輸送される速度に敏感に依存するために、この量の正確な推定を得るためには、直接の実験測定が必要となる。

【0027】全体で 8 cm のグレーティングを用いるデバイスについて測定が行なわれた。これらグレーティングは一樣なブラッググレーティングの両端に存在する鋭い境界に起因する妨害（干渉）効果を低減するために適当にアボダイズされた。これらデバイスが標準の電気通信ファイバ（ゲルマニウムを含む）に製造され、適当に水素化された。

【0028】図5aは、ファイバグレーティングの長さ方向に沿っての膜厚の光学測定値を示す。この特定のサンプルでは、金属の膜厚は、約 $5 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ の範囲で変化する。実線は、目標プロファイルを示す。これは、ファイバの長さ方向に沿っての距離に反比例して変化し、所定の電流に対して、グレーティングの両端の間で所望の温度のエクスカージョン（格差）が達成できるように設計される。膜厚測定における不確かさは $1 \mu\text{m}$ のオーダーである。図5bは、図5aに示す実線からの膜厚の偏差を示す。ファイバの長さ方向に沿っての殆どの部分では、この偏差は測定の不確かさ（つまり、 $1 \mu\text{m}$ ）に匹敵し、グレーティングの両端近傍においてのみこの値を超える。

【0029】図6aは、ファイバグレーティングデバイスに加える電圧を増すことで得られる典型的な測定反射スペクトルを示す。つまり、それぞれ、（1）グレーティングの無チャープ状態に対応する 0 V 、（2） 0.611 V 、（3） 0.82 V 、および（4） 1.1 V の電圧が加えられたときの反射スペクトルの様子を示す。グレーティングの長さ方向に沿って単調的かつ概ね線形的に変化するこの加熱（発熱）のために、反射スペクトルが一樣に広がる。反射スペクトルの幅が広がるの

に伴って、反射ピークの中心も、全体的にシフト（移動）することに注意する。図6bは、反射ピークの幅の変化と、反射ピークの中心波長のシフトの関係を示す。このデータの直線性は、デバイスの線形的な温度依存性と一貫するものである。一般的には、このシフトは望ましいものではなく、このため、機械的ストレイン（歪み）、あるいは、追加の発熱もしくは吸熱によって補償することを必要とされる。

【0030】図7～10は、デバイスの分散特性を示す。図7は、1Vの電圧を加えたときの、デバイスの測定グループ遅延と波長の関係を示す。点線は、データの線形挿入を示すが、これは、 $D = -352 \text{ ps/nm}$ なる傾きを有する。グループ遅延には小さな構造が存在することに注意する。これが、図8に、測定グループ遅延の直線性からの偏差として鮮明に示される。このピーク・ツウ・ピーク変動は10ps以下である。この測定の解像度は0.005nmであり、従って、より精密なスケールでは、この構造が存在する可能性は小さい。この構造は、チャープドブラッググレーティングでは典型的に見られ、グレーティングおよび加えられるチャープの品質の尺度となるが、上述の構造の規模は他の様々な文献で報告されている最良の結果に近い。

【0031】グループ遅延に構造が発生する原因としては、(a) グレーティング製造過程に不完全性が存在し、このため、グレーティングプロファイルの局所有効屈折率にノイズが発生する；(b) ファイバのコア径に変動が存在し、このため、コアモードの有効屈折率に小さな偏差が生じ、このためにグレーティングプロファイルに追加の“ノイズ (noise)”が発生する；(c) アボダイゼーションが理想的ではなく、このためにグレーティング内に望ましくない妨害（干渉）効果が出現する（ただし、これは系統的リブルとして出現し、おそらくは大きな問題とはならない）；(d) 膜厚プロファイルが所望のプロファイルからずれていた、抵抗率や表面のテクスチャが一様でなかったりし、このために温度の望ましくない変動が発生する；などが考えられる。現時点では、これら変動の主要な原因について断定することはできないが、図6bは、膜厚の変動が重要であることを示唆する。厳密に長さ方向に反比例することからの測定膜厚の偏差の方が、パーセントでは、線形性からの測定グループ遅延の偏差より大きなことは、注目に値する。これは、ファイバの長さ方向に沿っての熱の拡散が、短い長さスケールで起こる発熱パワーの分布の小さな不均一性を“平滑化 (smooth out)”する傾向を持ち、この効果のため、膜厚あるいは他の膜特性の小さな変動の影響が軽減されるためであると考えられる。

【0032】図9は、グレーティングデバイスの測定グループ遅延応答を、様々な印加電圧の値、すなわち

(1) 0.53V、(2) 0.611V、(3) 0.72V、(4) 0.82V、(5) 0.94V、および

(6) 1.1Vに対して示す。この図は、分散の調節能力（チューナブリティ）を示す。測定グループ遅延の“ノイズ (noise)”は、分散値が増加すると幾分増加するが、ただし、分散が最大にされた場合でも、線形性からの偏差はたった20psであることに注意する。

【0033】図10は、測定グループ速度分散と印加電圧の関係を示す。実線は、分散が印加電圧の二乗の逆数に比例することを想定したときのデータの理論挿入を示す。測定最大分散は、約 $D = -1350 \text{ ps/nm}$ であり、これは、0.4Vの印加電圧および対応する0.4Wなる電力に対応する。印加電圧を増すと、温度勾配、従って、グレーティングの帯域幅は増加し、このため、グレーティングの分散は低減する。

【0034】この実験における最大印加電圧は、200℃近傍のピーク温度に対応する約1.1V（約1Wなる電力）に選択された。これは、信頼性に問題が発生することのない十分に低いレベルである。逆に、これより高い温度では、多くの問題が発生し、現実的でない。例えば、これより高いレベルでは、アニーリングを相殺するために初期の屈折率変化をより高くすることが、デバイスの安定性を確保するために必要となる。

【0035】この研究は、分布型オンファイバ抵抗ヒータを用いてファイバ内の所望の温度分布、従って、分散を達成する、ファイバブラッググレーティングデバイスの設計について示した。これは、このデバイスが、電力効率に優れる、サイズがコンパクトである、製造が簡単である、光学特性を制御できるなど様々な魅力的な長所を持つためである。上述のように、このデバイスは、分散を、 -300 ps/nm から -1350 ps/nm の範囲で連続的にチューニング（調節）でき、このときの線形性からの平均偏差は、約10psであることが実験的に明らかにされた。従来の研究から、分散補償グレーティングの最適動作のためには、分散の線形性からの測定平均偏差は、ビット期間よりかなり小さいこと、好ましくは、10%のオーダである必要があることが認識されている。ここに開示されるデバイスは、線形性からの10psなる測定グループ遅延偏差を持ち、従って、10Gbit/s光波システム（約100psのビット期間）に用いるのに十分に耐えられる。40Gbit/sの動作では、グレーティングの設計および金属コーティングの改善を図ることでリブルをさらに低減することが必要となるが、ただし、このグレーティングデバイスで達成可能な最大分散はグレーティングの絶対長によってのみ制約され、従って、より長いファイバブラッググレーティングを用いることで劇的に増加することができる。

【0036】さらに、上述のように、熱の軸方向への拡散のために、限定的ではあるが、膜厚の小さな望ましくない変動あるいは他の不完全性が原因で短い長さスケール（～1mm）の間で発生する加熱パワーの微小な変動の影響が“平滑化 (smooth out)”され、グループ遅延

の線形性が改善されることが期待できる。

【0037】3. データ保全性(健全性)モニタ図11は、図2の実施例に用いるのに適する一例としてのデータ保全性(健全性)モニタ20を示す。データ保全性モニタ20は、光フィルタ120、光電気コンバータ(O-Eコンバータ)121、およびRFスペクトラムプロセッサ122を備える。このモニタは、さらに、補償器へのフィードバック制御信号を計算するためのデータプロセッサ123を備える。フィルタ120としては、例えば、チャンネルフィルタが用いられ、O-Eコンバータとしては、例えば、光ダイオードが用いられる。動作においては、フィルタ120が、解析すべきスペクトル領域を選択し、次に、O-Eコンバータ121が、フィルタリングされた光信号を対応する電気信号に変換する。次に、スペクトラムプロセッサ122が、O-E変換されたRFスペクトラムを決定し、データプロセッサ123が、このスペクトラムを解析し、システムを最適化するためのフィードバック信号を計算および生成する。スペクトラム最適化のための単純なスキームにおいては、低周波成分が最小化される。このような最適化フィードバック信号を生成する方法については、F.Heismannらによる論文“Automatic Compensation of First Order Polarization Mode Dispersion in a 10 Gb/s Transmission System”, Proceedings ECOC, '98, pp.529-530(1998)において説明されているために、これを参照されたい。

【0038】このデータ保全性モニタは、長所として、受信機を必要としない。つまり、受信されたデータのエラー率を計算する必要はなく、フィードバック制御信号を生成するために、光信号の電気的データおよびクロックを抽出する必要はない。オプションもしくは補助機能として、分散補償器30'を遠隔地に配置し、これをフィードバック信号に基づいて遠隔的に制御することもできる。

【0039】図12は、順方向エラー検出を用いるデータ保全性モニタ20の代替実施例を示す。この実施例においては、フィードバック信号の生成は、受信機端末内に組み込まれる。データ保全性モニタ20は、光フィルタ120、O-Eコンバータ121、データクロック回復回路130、エラー検出回路131を備えるが、典型的にはこれらの全が受信機内に組み込まれる。データ保全性モニタ20は、さらに、エラー率を計算し、これに基づいて最適化フィードバック制御信号を生成するためのデータプロセッサ132を備える。フィードバック制御信号は、システムを通じてのデータの保全性を最適化する、すなわち、エラーを最小化することを目標とする。

【0040】動作においては、各波長チャンネルの光データは、順方向エラー検出アルゴリズムに対するオーバーヘッドビットを含む。典型的には、このアルゴリズムは、リードソロモン(Reed Solomon)順方向エラー検出コー

ドとして実現される(これに関しては、例えば、BAG.Le e, M.Kang, J.Leeからよる、リードソロモンコードおよびこれらの実現を含む順方向エラー検出アルゴリズムに関する著作“Broadband telecommunication technology”, Artic House, 1993を参照されたい)。光波チャンネルは、可変分散補償器に通されるが、これは、受信機端末と同一位置に設けることも、端末から離れた遠隔地に配置することもできる。後者の場合は、分散補償器への制御信号は、管理シグナリングシステムを介して遠隔分散補償器30'に送信される。受信機端末において、光データが光学的にフィルタリングされ、特定の波長のチャンネルが選択される。次に、これらデータが、O-Eコンバータ121によって電気領域に変換され、受信された波長チャンネルから、クロックおよびデータが抽出される。次に、こうして回復されたデータは、エラー検出回路131に送られ、ここで、実現される特定のエラー検出アルゴリズムに基づいて、データが修正された後、受信機端末の出力に送られる。エラー修正回路は、所定の時間内に修正されたビットの数に関する情報も提供する。この数に基づいて、エラー修正を行なう前の、すなわち、分散補償器に現在加えられている制御信号の値に対応するビットエラー率が計算される。次に、現在のエラー率および制御信号を、前の設定に対応するエラー率および制御信号と比較することで、 $D_{error_rate}/D_{control_signal}$ なる比が計算される。この比は、ビットエラー率を最小化するために、制御信号を、どれだけ、どの方向に調節すべきかを示す。次に、こうして計算された制御信号が分散補償器に加えられ、新たなビットエラー率が測定され、これに基づいて新たな制御信号が計算される。

【0041】図13は、エラー修正アルゴリズムの代わりに、データを運ぶためのフレーミングフォーマットのエラー検出能力(機能)を用いるデータ保全性モニタ20のもう一つの代替実施例を示す。このデータ保全性モニタ20は、図12のデータ保全性モニタ20と、主に、データプロセッサ132のプログラミングが異なる。このようなフレーミングフォーマットの一例としては、SONETがある。SONETは、SONETフレーム内のBオクテットを介して、エラーを(修正するのではなく)検出する機能を提供する。こうして、SONETフレームのBオクテットにアクセスし、これを処理することで、エラー率を計算することが可能となる。フィードバック信号生成の実現については、図12との関連で説明した実現と類似する。エラー率の検出とフィードバック信号生成のこの実現は、データがフレームにパッケージ化され、これらフレームがエラー検出(あるいはエラー修正)情報を含むあらゆるシグナリングプロトコルに対して有効である。このような伝送プロトコルの例としては、ATMや、FDDIプロトコルがあり、ATMの場合は、エラー率はHECバイトを処理すること

で得られ、FDDIの場合は、伝送エラーの存在はFDDIフレームのフレーム状態セクション内に示される。この場合、エラー検出回路は、ATMフォーマットあるいはFDDIフォーマットのエラーを検出することとなる。

【0042】以上、本発明の様々な実施例について説明したが、上述の実施例は、本発明の原理の可能な多数の実現の一部を、単に、解説の目的で示したもので、当業者においては、他の多数の様々な構成を本発明の精神および範囲から逸脱することなく考案であるものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】静的分散補償モジュールを用いる従来の光ファイバ通信システムを簡略的に示す。

【図2】本発明による一つあるいは複数の自動分散補償モジュールを備える光ファイバ通信システムを簡略的に示す。

【図3】図2のモジュールに用いるのに適する一例としての可変分散補償要素を示す。

【図4】Aは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。Bは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。Cは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。Dは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図5】Aは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。Bは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図6】Aは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。Bは、図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図7】図3の可変分散補償要素の動作を理解するため

に有益なグラフを示す。

【図8】図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図9】図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図10】図3の可変分散補償要素の動作を理解するために有益なグラフを示す。

【図11】図2のモジュールに用いるのに適する一例としてのデータ保全性（健全性）モニタを簡略的に示す。

【図12】図2のモジュールに用いるのに適する一例としてのデータ保全性（健全性）モニタを簡略的に示す。

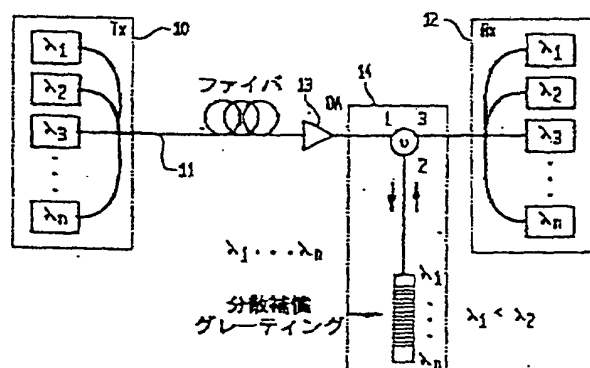
【図13】図2のモジュールに用いるのに適する一例としてのデータ保全性（健全性）モニタを簡略的に示す。

これら図面は、単に本発明の概念を解説することを目的とし、グラフを除いては、正確な縮尺ではないことに注意する。

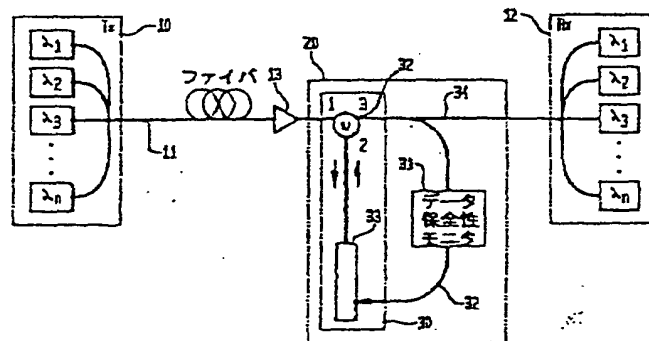
【符号の説明】

- 10 送信機
- 11 伝送ファイバ路
- 12 受信機
- 13 光増幅器
- 20 自動（動的）分散補償モジュール
- 30 可変分散補償器
- 31 データ保全性（健全性）モニタ
- 32 フィードバック網
- 33 可変分散補償グレーティング（DCG）
- 34 タップ
- 120 光フィルタ
- 121 光電気コンバータ（O-Eコンバータ）
- 122 RFスペクトラムプロセッサ
- 123 データプロセッサ

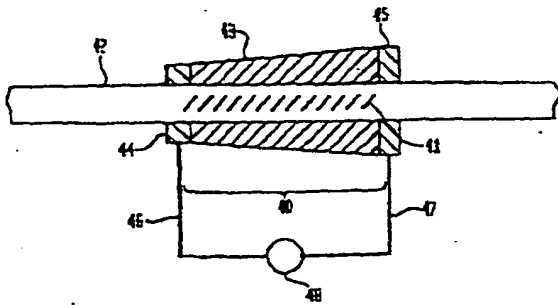
【図1】



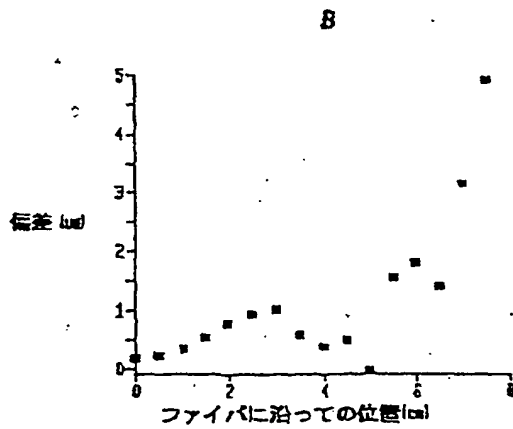
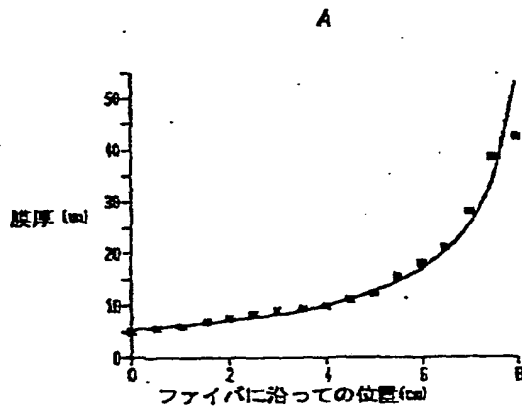
【図2】



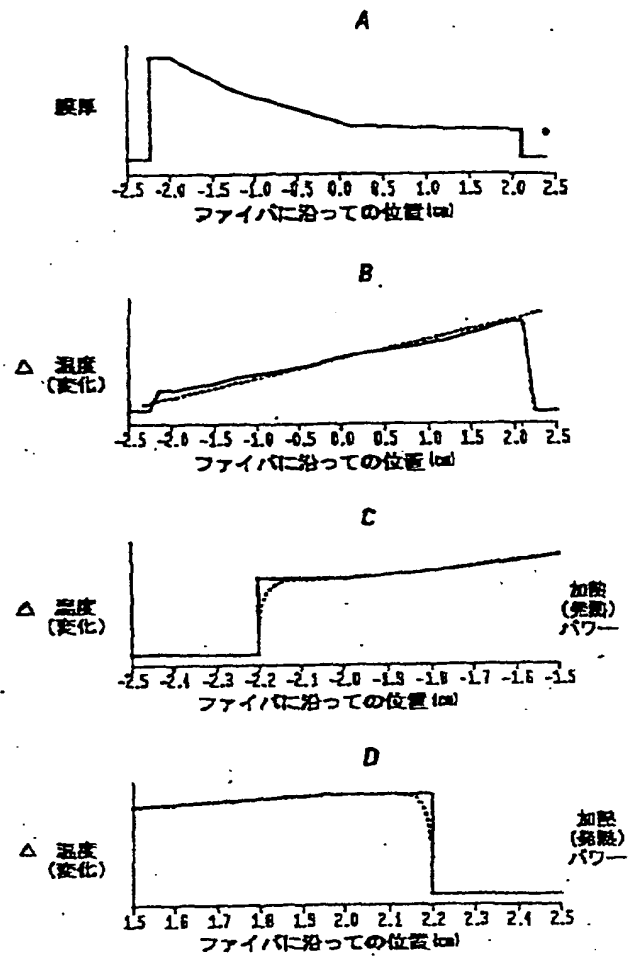
【図3】



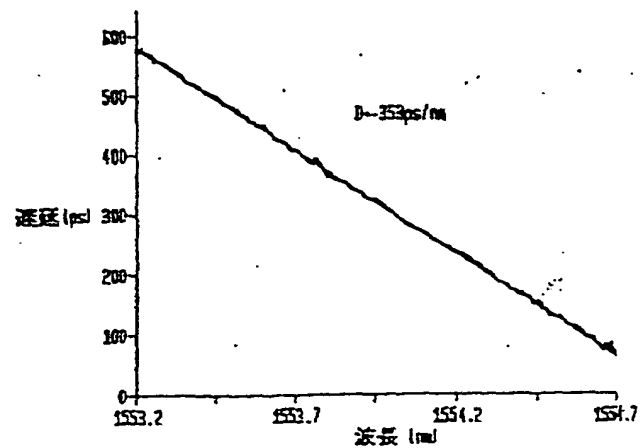
【図5】



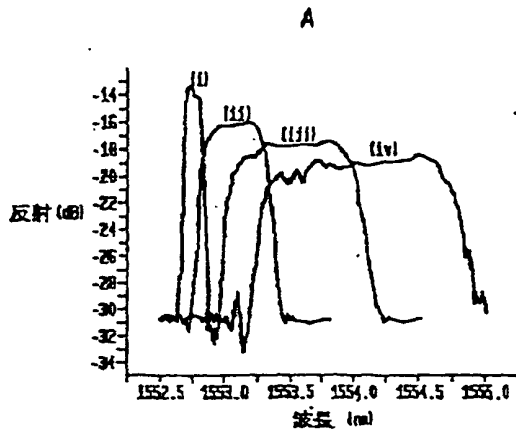
【図4】



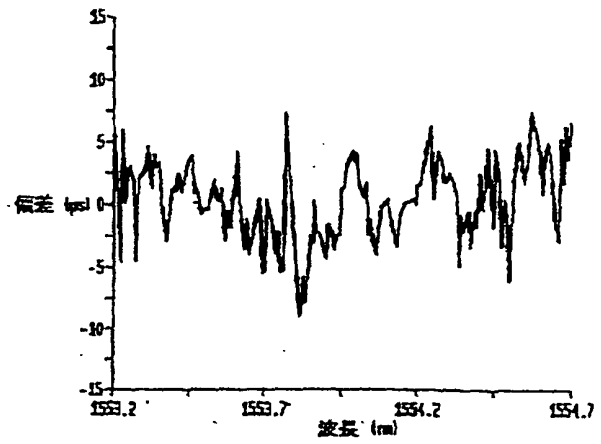
【図7】



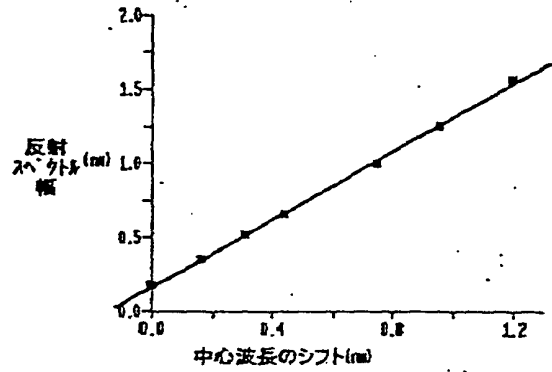
【図6】



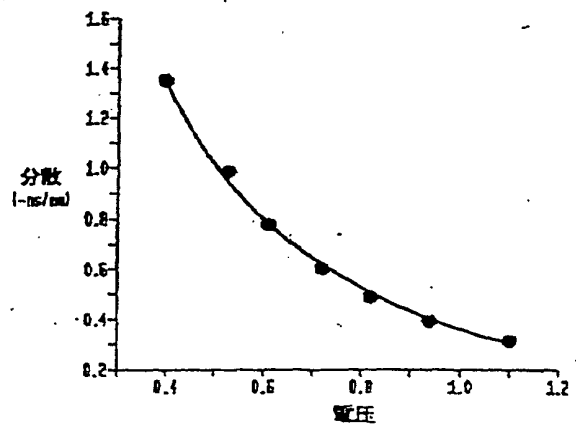
【図8】



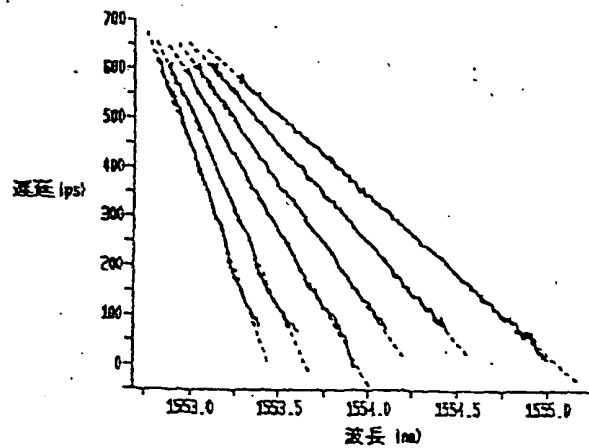
B



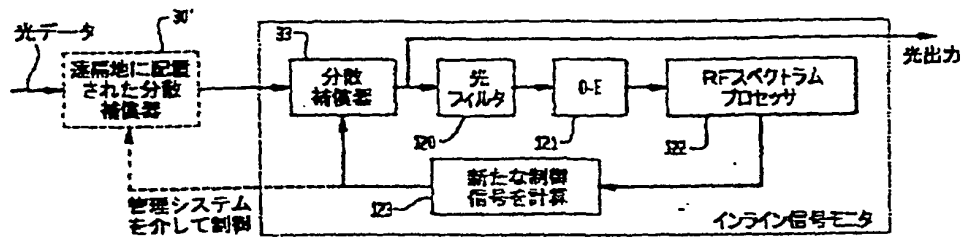
【図10】



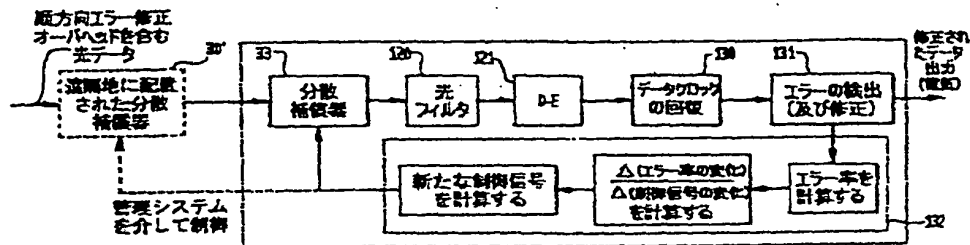
【図9】



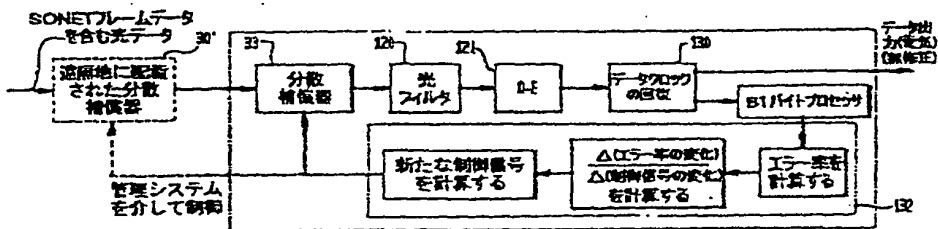
【図11】



【図12】



【図13】



フロントページの続き

(72)発明者 トーベン エヌ ニールセン
アメリカ合衆国 07750 ニュージャージー
イ, モンマウス ビーチ, オーシャン ア
ヴェニュー 45, アpartment 8 ビー

(72)発明者 ジョン エー. ロチャース
アメリカ合衆国 07974 ニュージャージー
イ, ニュー プロヴィデンス, スプリング
フィールド アヴェニュー 1200 アパー
トメント 1シー

(72)発明者 トーマス アンドリユー ストラッサー
アメリカ合衆国 07060 ニュージャージー
イ, ワレン, ハーモニー ロード 6

(72)発明者 ケネス リー ウォーカー
アメリカ合衆国 07974 ニュージャージー
イ, ニュー プロヴィデンス, セントラル
アヴェニュー 1003